Vulnerabilità e resilienza, un'analisi matematica della rete Amazon

La pandemia e l'incidente della Ever Given hanno messo in risalto l'estrema vulnerabilità delle supply chain globali e l'utilità delle ricerche alimentate dalla rivoluzione logistica per indagare le applicazioni di alcune teorie matematiche a esse per individuare punti deboli e punti di forza, strategie offensive e difensive. Tra queste la teoria dei grafi.

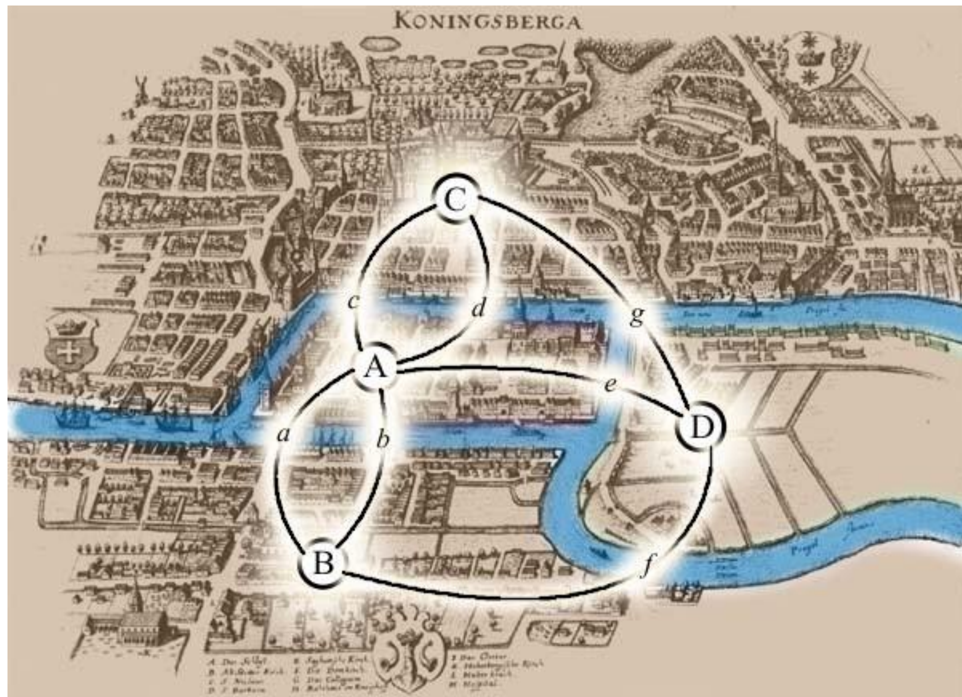
MARCO VERUGGIO, gennaio 2021

La logistica nasce all'interno della sfera militare come disciplina volta ad assicurare i collegamenti tra le diverse unità e località teatro di operazioni di guerra e i rifornimenti di truppe, munizioni, equipaggiamento e vettovaglie. "Il trasferimento e il rifornimento delle truppe sono un complemento fondamentale all'elaborazione della tattica e della strategia. L'esito di una battaglia dipende spesso da un loro preciso coordinamento". Questa osservazione di Ernest Mandel (*Il significato della Seconda guerra mondiale*, PuntoCritico, 2021, p. 98) potrebbe essere riproposta pari pari mettendo la parola "merci" al posto di "truppe" e aggiungendo a tattica e strategia l'aggettivo "commerciale". Assumendo questo punto di vista diventa evidente quanto oggi per l'economia globale sia cruciale saper affrontare e risolvere in modo sistematico alcuni problemi che hanno origine proprio nello specifico dominio delle operazioni militari. Tra questi ottimizzare la collocazione dei magazzini e predisporre piani di difesa e reazione rapida a perturbazioni esterne, come catastrofi naturali o incidenti (si pensi all'intraversamento della Ever Given nel canale di Suez nel marzo del 2021) e ad attacchi intenzionali ai magazzini o ai loro collegamenti. Nel caso di Amazon sullo sviluppo del suo *network* pesano sia esigenze di ottimizzazione (riduzione dei costi, dei tempi di consegna, condizioni ambientali in senso lato ecc.) sia preoccupazioni legate alla prevenzione di potenziali minacce, inclusi eventuali conflitti sindacali.

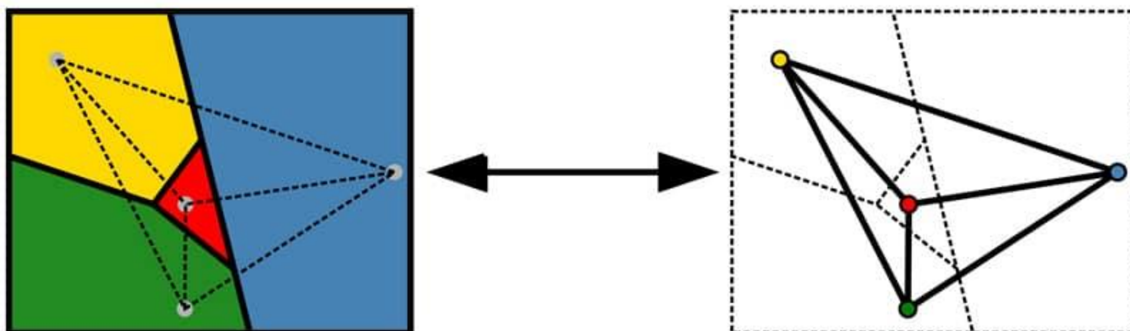
La teoria dei grafi

Esiste un'ampia letteratura sia sulle scelte di ottimizzazione della rete, inclusa la collocazione degli impianti (*facility location problem*) sia sul tema della vulnerabilità e della resilienza delle catene di fornitura (*supply chain*). Tra gli strumenti a cui si ricorre per trattare questi due temi c'è la teoria matematica dei grafi. I grafi sono oggetti costituiti da insiemi di "nodi" collegati tra loro da "archi" che permettono di descrivere un'ampia gamma di situazioni e di processi concreti facendo leva su metodi quantitativi e procedure algoritmiche.

Comunemente si attribuisce la nascita della teoria dei grafi al noto problema dei sette ponti di Königsberg (XVIII secolo). La città della Prussia orientale si era sviluppata sulle sponde del fiume Preger e su due isole nel suo letto collegate tra loro, appunto, da sette ponti. Era possibile tracciare un itinerario che li percorresse tutti una volta senza mai ritornare sui propri passi? Da buon matematico Eulero semplificò il problema disegnando un grafo i cui nodi erano le quattro zone in cui il Preger divideva la città (nella figura sotto: A, B, C, e D) e gli archi i sette ponti (a, b, c, d, e, f e g) e dimostrò che il problema non aveva soluzione e che, più in generale, quel tipo di problema ha soluzioni solo se su tutti i nodi del grafo insiste un numero pari di archi oppure se due di essi hanno un numero dispari di collegamenti. In quest'ultimo caso l'itinerario inizia da uno di questi due nodi e si conclude nell'altro.



Nel secolo successivo i grafi vennero utilizzati per cercare di risolvere un altro problema pratico: disegnare una mappa del mondo usando il minor numero di colori per distinguere i paesi confinanti. Nel grafo usato per schematizzare il problema a ogni paese corrispondeva un nodo, mentre gli archi univano tra loro i nodi corrispondenti ai paesi con un confine in comune. Nell'Ottocento si intuì che erano sufficienti quattro colori, ma la dimostrazione arrivò solo nel 1977 grazie alla straordinaria potenza di calcolo dei moderni *computer*.

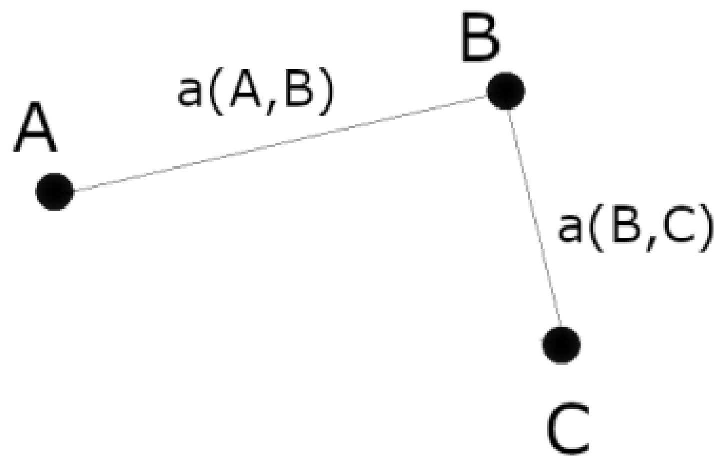


Per cercare di spiegare nel modo più comprensibile come la teoria dei grafi può essere applicata alla logistica introduciamo alcune nozioni e notazioni elementari.

DEFINIZIONI

Un **grafo** è la figura G(V, A) individuata da un insieme V={v_1,…,v_n} di n punti detti **nodi** o vertici e da un insieme A={a_1,…,a_k} di k segmenti detti **archi** che congiungono coppie di nodi appartenenti a V (i matematici direbbero che A è un sottoinsieme del prodotto cartesiano VxV). Con a_{ij} si indica l'arco a(v_i,v_j) che collega i nodi v_i e v_j appartenenti a V. Due nodi collegati da un arco si dicono **adiacenti** e, analogamente, due archi sono **adiacenti** se hanno un nodo in comune. La figura seguente aiuta a visualizzare il significato di questa notazione apparentemente un po' astrusa. Dati tre nodi A, B e C indicheremo con a(A,B) e a(B,C) i due

archi che collegano rispettivamente A con B e B con C. Il nodo A è adiacente a B, il nodo B adiacente a C, i due archi a(A,B) e a(B,C) sono adiacenti tra loro.



Se tra i nodi del grafo è fissato un senso di percorrenza, cioè ad esempio a(A,B) e a(B,C) possono essere percorsi solamente da A a B e da B a C, siamo di fronte a un **grafo orientato**. In questo caso si dice che l'arco a(A,B) **esce** da A ed **entra** in B; A si dice **predecessore** di B e B **successore** di A. Un **cammino** è una sequenza di archi in cui ogni coppia di archi consecutivi sono adiacenti: nel nostro caso a(A,B) e a(B,C) sono un cammino da A a C. Se il cammino può essere percorso solo in un senso è un **cammino orientato**. Un grafo si dice **connesso** se per ogni coppia di nodi A e B esiste sempre un cammino che li collega e **fortemente connesso** se tra i due esiste sempre un cammino orientato. Infine il **grado** di un nodo è il numero degli archi che insistono su quel nodo. Nella figura sopra, ad esempio, B ha grado 2, A e C grado 1.

Dai grafi alla logistica: ottimizzazione

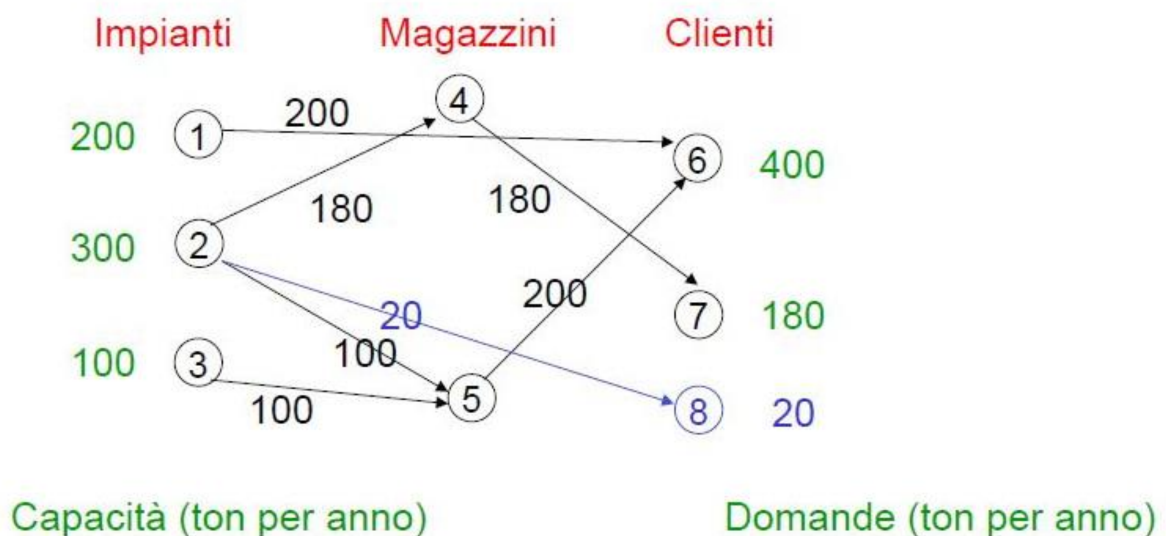
Une rete logistica può essere rappresentata da un grafo G(V,A) in cui i nodi sono impianti di produzione, magazzini e clienti e gli archi collegamenti stradali, ferroviari, aerei o navali e a ogni arco a_{ij} tra i nodi v_i e vj possono essere associati quattro numeri interi l_{ij}, h_{ij}, c_{ij} e x_{ij} che rappresentano rispettivamente 1. la capacità massima e 2. quella minima, 3. il costo unitario del trasporto e 4. il flusso di merci relativi a quell'arco. Questa rappresentazione permette di ricondurre alcuni dei più comuni problemi logistici a un'operazione abbastanza semplice come la ricerca del minimo di una funzione che ha come variabili quelle grandezze, su cui è possibile imporre dei vincoli (ad esempio vincoli di capacità di una strada o vincoli di costo).

Ipotizziamo di dover trasportare una determinata quantità di merce da uno o più impianti di produzione a uno o più clienti passando attraverso alcuni magazzini di stoccaggio intermedi e di voler ridurre al minimo i costi. Possiamo rappresentare questa situazione con un grafo G(V,A) in cui F è l'insieme di nodi appartenenti a V corrispondente ai fornitori e C l'insieme dei nodi di V corrispondenti ai clienti; d_i è la quantità di merce disponibile per ogni nodo fornitore, mentre r_i è la quantità di merce richiesta da ogni nodo cliente. Infine l_{ij}, h_{ij}, c_{ij} e x_{ij} sono rispettivamente la capacità massima e minima, il costo di trasporto e il flusso relativo ad ogni arco a_{ij} appartenente ad A. Allora la soluzione consisterà nel cercare il minimo di una funzione, cioè il valore della variabile x che rende minimo il valore della funzione f(x) definita come la sommatoria dei prodotti tra costo unitario di trasporto e quantità di merce per ogni arco della rete logistica che unisce i nodi fornitori ai nodi clienti, imponendo come vincoli che

il carico sia compreso tra la portata minima e la portata massima di ciascun arco e che la somma di merce disponibile che esce da ogni nodo produttore e la somma di merce richiesta che entra in ogni nodo cliente si equivalgano. In termini matematici indichiamo questo valore con

$$\min f(x)=\Sigma c_{ij}x_{ij} \text{ con } i,j\in V,\ l_{ij}\leq x_{ij}\leq h_{ij} \text{ e } \Sigma d_i=\Sigma r_j, \text{ con } i\in F \text{ e } j\in C.$$

Analogamente potremmo essere interessati a calcolare come esaudire la domanda annua dei nostri clienti riducendo al minimo costi di trasporto e stoccaggio, decidendo quanto produrre nei diversi impianti di produzione di cui disponiamo, quanta merce stoccare in quali magazzini e quali strade percorrere per consegnare la merce. La figura seguente illustra il caso di un'azienda con tre impianti produttivi (1,2,3) e una capacità produttiva annua di 700 tonnellate, che deve soddisfare una domanda complessiva annua di 680 tonnellate da parte di due clienti (6,7) utilizzando una rete logistica in cui tutti gli archi hanno una capacità massima di 200 tonnellate e in cui i costi di trasporto e stoccaggio nei magazzini (4,5) sono riassunti nella tabella sottostante.



Costi di trasporto e produzione/stoccaggio (migliaia di Euro per ton)

	Magazzino 1	Magazzino 2	Cliente 1	Cliente 2
Impianto 1	2,0	1,0	2,0	4,0
Impianto 2	1,0	1,0	8,0	9,0
Impianto 3	1,0	0,5	10,0	8,0
Magazzino 1			5,0	1,0
Magazzino 2			2,0	7,0

Fonte: Paolo Detti, *Gestione della produzione e della supply chain. Logistica distributiva*, Dip.to di Ingegneria dell'Informazione, UniSi, il cliente 8 è fittizio ed è stato inserito per questioni formali quale destinatario dell'eccesso di capacità produttiva rispetto alla domanda, ipotizzando che il trasporto verso questo "cliente immaginario" abbia costo zero.

Aldilà del formalismo matematico ciò che importa è che i due problemi presi in considerazione a mo' di esempio possono essere risolti attraverso un'operazione matematica abbastanza semplice come la ricerca del minimo di una funzione in una variabile. Analogamente anche il problema della collocazione di un magazzino può essere affrontato

introducendo come variabile della funzione le coordinate di un ipotetico nuovo nodo della rete e imponendo dei vincoli di costo o di tempo per le consegne effettuate da quel magazzino. La scelta di una collocazione vicina a una grande arteria di comunicazione, ad esempio, riduce i tempi evitando strade a bassa capacità e facilmente congestionabili. Per quanto riguarda Amazon i rari tentativi di mappatura integrale della sua rete di distribuzione mostrano come i suoi nodi si collochino perlopiù vicino a importanti nodi autostradali e aeroportuali. Di recente inoltre nelle grandi aree urbane assistiamo al moltiplicarsi di piccoli magazzini dedicati alla copertura dell'ultimo miglio, allo scopo di velocizzare il servizio per i clienti di maggior valore, in particolare gli abbonati Prime (Amazon Plans to Put 1,000 Warehouses in Suburban Neighborhoods, 16 settembre 2020).

Vulnerabilità e resilienza

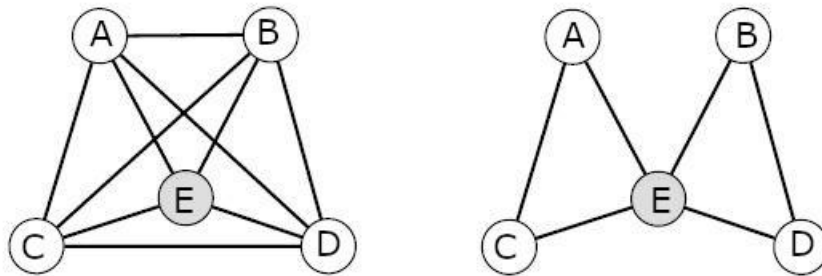
La pandemia di Covid-19 ha mostrato che l'odierno capitalismo, fondato sui due pilastri della globalizzazione e del *just-in-time*, è esposto più di quanto si pensi a turbolenze e attacchi di varia natura e, così facendo, ha incrinato una malintesa fede nell'onnipotenza della tecnologia, alimentando l'attenzione degli studiosi sul tema della vulnerabilità delle reti logistiche. "La logistica è stata caratterizzata come l'Internet fisico e tale definizione le si attaglia alla perfezione. Perché? L'informatica (o, come si dice oggi, la digitalizzazione) è indispensabile per gestire il processo di produzione, ma oggi si rivela incapace di riavviare tale processo se un intoppo fisico, concreto e di lunga durata si manifesta contemporaneamente in diversi luoghi. La componente fisica è più forte di quella virtuale" è la sintesi icastica fatta da Sergio Bologna del nostro brusco risveglio dall'ottimismo tecnologico (Sergio Bologna, Besonderheit der heutigen Krise, Sozialgeschichte Online 31/2021).

Bologna individua le radici della vulnerabilità della logistica nella sua natura di processo cooperativo tra soggetti caratterizzati da rapporti di forza reciproci diseguali e instabili:

La logistica crea una (o più) supply chain *(catene di fornitura). La catena di fornitura è un processo di cooperazione tra servizi diversi, di cui possiamo considerare quale autentica sostanza la sincronizzazione dei diversi anelli della catena. Nel corso del tempo tale sincronizzazione è diventata sempre più fitta e capillare. Gli straordinari progressi nel campo dell'informatica, della robotica e della tecnologia dei sensori digitali hanno suscitato l'illusione che ogni ostacolo fisico possa essere superato e che una* supply chain *al riparo da possibili perturbazioni avrebbe risolto ogni problema di distanziamento geografico, in quanto tutti i soggetti posti sul suo percorso nel mondo virtuale avrebbero parlato un linguaggio comune, comprendendosi, così da potersi scambiare dati coi propri* partner*. Qui si è posto innanzitutto il problema che per poter raggiungere una perfetta sincronizzazione tutti i soggetti coinvolti devono mettere i propri dati a disposizione. Ciò a molte imprese è apparso un sacrificio eccessivo. E a quel punto si è posta la questione di chi dovesse esercitare la propria autorità sulla pianificazione, poiché la sincronizzazione dipende dalla pianificazione e senza di essa non è praticabile. Per evitare conflitti tra i* leader *di mercato l'onere posti da questo problema è stato scaricato su imprese che non hanno sufficiente forza per agire autonomamente, poiché non possono condurre altra forma di esistenza che quella di imprese di sub o sub-subappalto. Non esiste forse altro campo della produzione e dello scambio in cui tante imprese forniscono le proprie prestazioni "in appalto" a qualcun altro.*

La teoria delle reti affronta il tema della vulnerabilità analizzando il danno inflitto a una catena logistica quando uno o più nodi sono resi inutilizzabili e gli archi che vi insistono impercorribili. I ricercatori hanno studiato l'impatto di una perturbazione che colpisce i nodi di rete di diversa tipologia, cancellandoli, in modo casuale o mirato. Così facendo hanno scoperto che uno dei fattori chiave della solidità di una rete è la presenza al suo interno di sottoinsiemi connessi (*cluster*), in cui ogni nodo è collegato a tutti gli altri da un arco. La rimozione di un singolo nodo può spezzare la rete in *cluster* non comunicanti, danneggiandola gravemente. Se definiamo coefficiente di *clustering* la probabilità che due nodi A e B connessi a un nodo C siano anche connessi tra loro, allora è chiaro che una rete

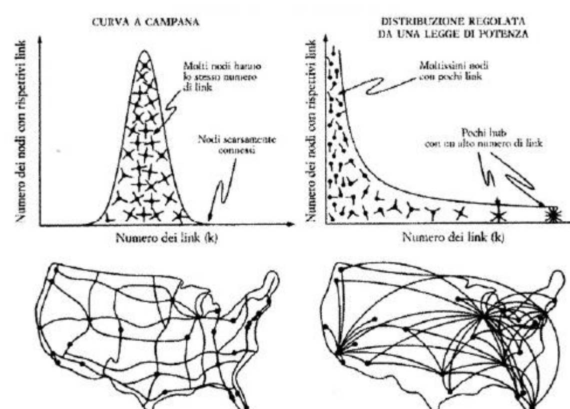
con un alto coefficiente di *clustering* è più solida. Nella figura a sinistra sotto il coefficiente di clustering per il nodo i è 1 (100%) perché considerando le sei possibili coppie di nodi del grafo collegate a E (A,B; B,D; D,C; C,A; A,D; C,B) i nodi che le compongono sono sempre collegati tra loro, mentre in quella a destra questo capita solo per due coppie (A,C e B,D). Col risultato che mentre nel primo caso la cancellazione di E non pregiudica la capacità dei restanti nodi di restare collegati nel secondo, invece, spezza il grafo in due cluster (A,C e B,D) isolati.



Sviluppando questo ragionamento e traendo spunto dall'osservazione della complessità dei fenomeni naturali e sociali, un articolo pubblicato su Nature nel 2000 osservò che

Molti sistemi complessi mostrano un sorprendente grado di tolleranza agli errori. Ad esempio alcuni organismi relativamente semplici crescono, si conservano e si riproducono nonostante drastici interventi farmaceutici o ambientali, una tolleranza agli errori attribuita alla robustezza della rete metabolica sottostante. Complesse reti di telecomunicazioni mostrando un sorprendente livello di solidità: sebbene alcuni loro componenti chiave evidenzino un regolare malfunzionamento, i guasti locali raramente conducono alla perdita della loro capacità complessiva di trasmettere informazioni. La stabilità di questi e altri sistemi complessi viene spesso attribuita al ridondante cablaggio della griglia di funzioni definita dalle componenti del sistema.

Gli autori dell'articolo, tuttavia, non si fermano qui, ma dimostrano che questa tolleranza all'errore – minore vulnerabilità e, dunque, maggiore resilienza – non è comune a tutti i sistemi ridondanti (nel nostro caso a tutte le reti connesse) ma appartiene solo a "una categoria di reti connesse in modo disomogeneo, chiamate reti a invarianza di scala, tra cui il *world wide web*, internet, i *social network* e le cellule" e che "tali reti evidenziano un inatteso grado di solidità, la capacità dei loro nodi di comunicare senza essere affetti da tassi addirittura irrealistici di errore" e tuttavia aggiungono che "questa tolleranza agli errori viene pagata a caro prezzo perché tali reti sono estremamente vulnerabili agli attacchi (cioè all'individuazione e alla rimozione di pochi nodi che giocano un ruolo vitale nel preservare la connettività della rete). Questa tolleranza agli errori e questa vulnerabilità agli attacchi sono proprietà comuni delle reti di comunicazione." (Albert R., Jeong R., Barabási A., Error and attack tolerance of complex networks, Nature, 2000)



Che cosa sono le reti a invarianza di scala? Volendo semplificare sono reti in cui convivono un alto numero di nodi con poche connessioni e un numero limitato di nodi iperconnessi, detti *hub*. Per descriverle in termini evolutivi e probabilistici potremmo dire anche che se si aggiunge un nuovo nodo la probabilità che esso sia collegato a un vecchio nodo è proporzionale al grado di quest'ultimo, cioè al numero di archi che vi insiste. Il grafico in alto a destra nella figura qui sopra illustra la distribuzione probabilistica dei nodi della rete delle linee aeree americane (disegnata sotto), rappresentata dal grafico di una funzione f(k) che a ogni numero intero k associa il numero di nodi che hanno k archi che li collegano ad altri nodi (sopra). Come si vede per chi ha una qualche familiarità con la geometria analitica la curva disegnata dalla funzione è un'iperbole, per cui $f(k)=1/k^n$. Poiché nella formula compare la potenza n-sima di k si dice che la distribuzione del grado dei nodi in questo tipo di rete segue una "legge di potenza". In altre parole all'aumentare di k il numero di nodi su cui insistono k archi si riduce esponenzialmente. Allo stesso tempo, essendo f soggetta a una legge di potenza, f(c k)= g(c) f(k) per ogni costante c, cioè il tipo di distribuzione dei gradi tra i nodi della resta la stessa anche se k viene sottoposta a trasformazioni di scala, di qui il nome di reti a invarianza di scala. Nella figura precedente il grafico a sinistra (in alto), che schematizza la rete dei collegamenti autostradali americani (sotto), invece rappresenta una distribuzione cosiddetta gaussiana, in cui la maggior parte dei nodi ha un numero medio di *link* mentre pochi nodi hanno il numero minimo o il massimo di *link* della rete. La distribuzione dell'altezza della popolazione italiana, in cui la maggior parte dei componenti si concentra intorno all'altezza media, mentre un numero ridottissimo di soggetti è altissimo o bassissimo, è un esempio di distribuzione gaussiana.

Veniamo al tema della vulnerabilità. Ciò che si osserva manipolando singoli nodi di reti di tipologie differenti è che nel caso delle reti casuali, in cui cioè i nodi si aggiungono a uno a uno senza seguire alcuna regola, man mano che si cancellano altrettanto casualmente dei nodi il loro grado di connessione diminuisce progressivamente, ma si registra un'accelerazione della sue perdita di connessione dopo che alcuni *cluster* secondari restano isolati dal *cluster* principale. Una rete a invarianza di scala, invece, non presenta tale soglia. Il suo grado di connessione diminuisce lentamente e in modo uniforme man mano che se ne cancellano i nodi, perciò la rete mantiene la propria solidità e la proprie prestazioni anche se viene cancellato un numero relativamente alto di nodi. Tuttavia se un attacco intenzionale prende di mira i suoi *hub*, i nodi iperconnessi, allora collassa rapidamente.

Vulnerabilità e resilienza del network di Amazon

Sappiamo che in Germania dopo i primi scioperi nei magazzini tedeschi Amazon ha aperto alcuni centri di distribuzione in Polonia (ma vicino ai confini tedeschi), così da poter agevolmente aggirare eventuali blocchi della sua rete di distribuzione (*Faire reculer Amazon! En Pologne les travailleur/euses s'organisent*, 13 settembre 2021 – *Licenziata da Amazon. Intervista a Magda Malinowska*, 1 dicembre 2021). Una forma di "resilienza" di cui ci sono esempi anche negli USA (*Charmaine Chua: una strategia sindacale per i lavoratori di Amazon*, 12 maggio 2021). Perciò diventa interessante chiedersi quali conclusioni possiamo ricavare dalla teoria dei grafi circa la vulnerabilità della sua rete di distribuzione. Per rispondere a questa domanda è necessario innanzitutto capirne le caratteristiche.

Alcuni studiosi si sono chiesti se in generale le reti logistiche siano a invarianza di scala. Nel 2014 un ricercatore cinese dell'Università Wuzi di Pechino, utilizzando la piattaforma di programmazione e calcolo Matlab, ha creato un modello di logistica di distribuzione e ha analizzato la distribuzione del grado dei suoi nodi, arrivando alla conclusione che si trattava di una rete a invarianza di scala, in cui l'esponente della legge di potenza si colloca tra 2 e 3

(Xinyu Zhang, *Analysis for Scale-Free Network Characteristics of Logistics Distribution Network*, 2014).

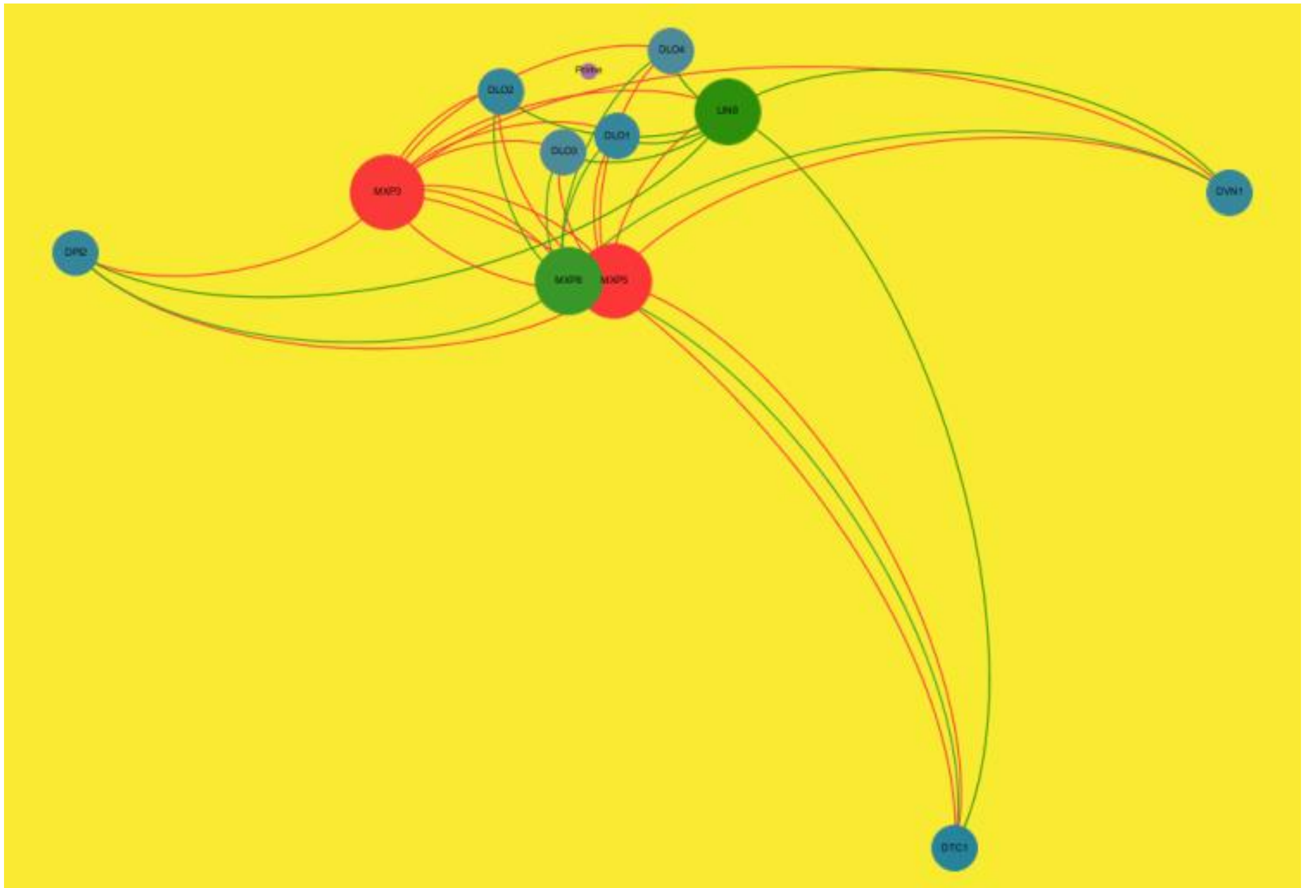
Altri studiosi, tuttavia, ammoniscono che anche se a volte leggendo la stessa letteratura scientifica si ha la sensazione che siano ovunque, in realtà le reti a invarianza di scala presenti in natura o nella sfera sociale sono relativamente rare. A rendere incerti i confini del fenomeno contribuisce anche il fatto che la stessa definizione di reti a invarianza di scala vari da un autore all'altro. Il generale criterio della distribuzione del grado secondo una legge di potenza talora viene reso più restrittivo introducendo ulteriori condizioni (ad esempio che l'esponente della potenza sia compreso tra 2 e 3: nel caso di internet si è calcolato che la legge di potenza ha esponente 2,48), in altri, al contrario, viene attenuato (ad esempio considerando sufficiente che la legge di potenza valga solo per i valori più alti della distribuzione). Ciò introduce anche la distinzione tra reti debolmente o fortemente a invarianza di scala (Anna D. Broido-Aaron Clauset, *Scale-free networks are rare*, marzo 2019).

Per quanto ci riguarda, poiché questo articolo non ha pretese accademiche, ma si propone esclusivamente di collegare alcune osservazioni empiriche con l'applicazione della teoria dei grafi alla logistica, non abbiamo la pretesa di stabilire in modo definitivo se la rete distributiva del colosso americano sia a invarianza di scala e se lo sia in modo forte o debole. Ci limiteremo a paragonare le due strutture e a trarne alcune conclusioni.

Nella figura della pagina successiva abbiamo creato un grafo della rete di Amazon nel centronord nel 2018, utilizzando Gephi, e ipotizzando che si tratti di una porzione di rete indipendente dai restanti magazzini, poiché si tratta di un numero esiguo di nodi collocati a notevole distanza dal resto della rete distributiva (all'epoca tre attorno a Roma e uno a Catania). Come si può vedere i nodi hanno colori diversi a seconda della tipologia di magazzini: in rosso i centri di distribuzione (*fulfillment center*), in cui la merce in arrivo dai fornitori viene stoccata e, man mano che arrivano gli ordini, confezionata nei pacchi e spedita; in verde i centri di smistamento (*sortation center*), in cui i pacchi vengono smistati verso le stazioni di consegna; in azzurro le stazioni di consegna (*delivery station*), da cui i pacchi sono affidati ai *driver* consegnati a domicilio; infine, in rosa *shocking* il magazzino Prime Now di Milano, dove è stoccata una limitata quantità di articoli da consegnare agli abbonati entro 24 ore dall'ordine. Il nodo Prime è sconnesso dal resto della rete. I nodi con un maggior numero di *link* sono rappresentati con un diametro superiore. Gli archi rappresentano collegamenti funzionali, non fisici, (cioè indicano un passaggio di merce tra due magazzini, non la "strada" tra uno e l'altro) e sono tracciati utilizzando il colore del nodo di provenienza con le seguenti regole:

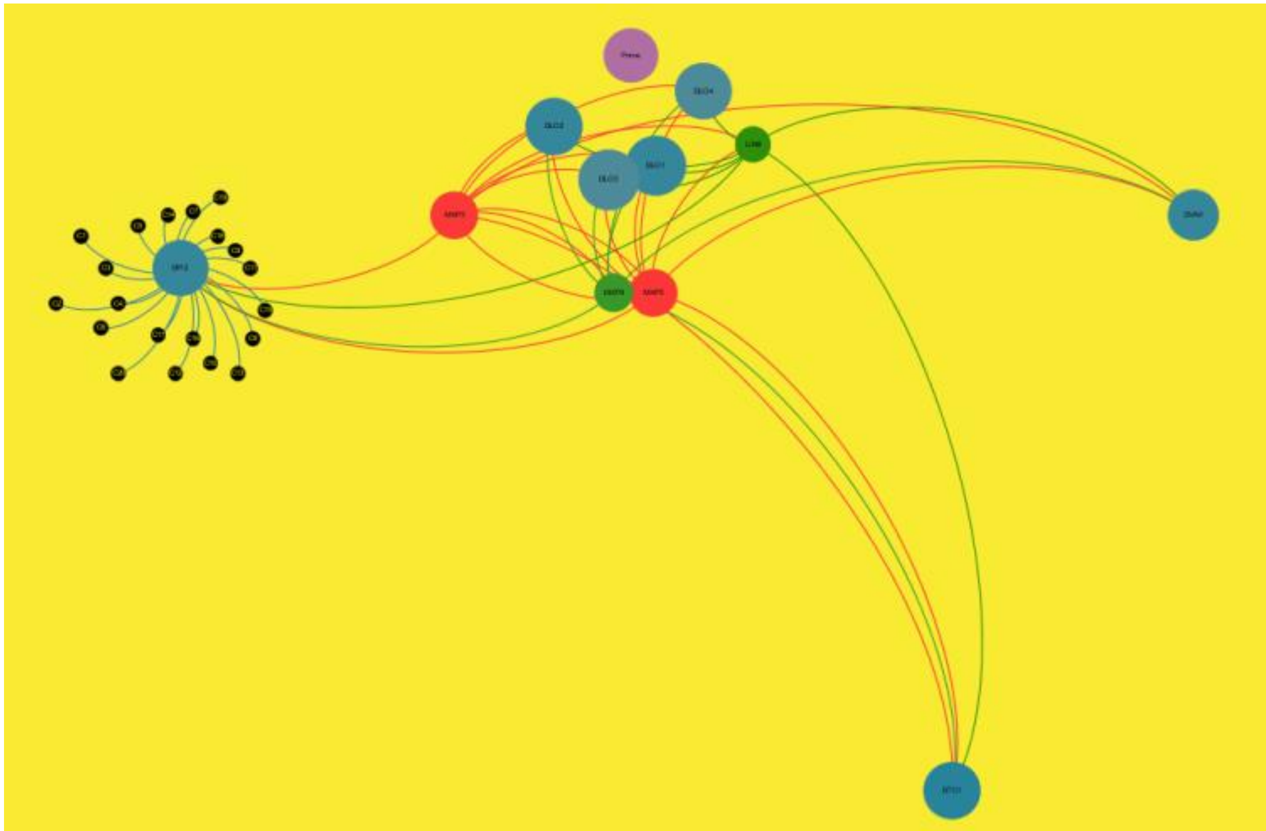
- dai centri di distribuzione a tutte le stazioni di consegna
- dai centri di distribuzione ai centri di smistamento
- dai centri di smistamento a tutte le stazioni di consegna
- dai centri di distribuzione ai centri di distribuzione.

Si tratta ovviamente di un modello molto grossolano della rete di Amazon, che non tiene conto, ad esempio, che ci sono magazzini dedicati ai pacchi voluminosi. Qui ci siamo limitati a prendere atto che i pacchi confezionati nei centri di distribuzione possono transitare nei centri di smistamento o dirigersi direttamente verso le stazioni di consegna e abbiamo ipotizzato che i centri di distribuzione siano collegati tra loro, in modo che gli articoli stoccati in uno possano essere spostati verso l'altro in caso di necessità. Ma si tratta di una semplificazione che ci pare non pregiudichi le conclusioni che ne trarremo.



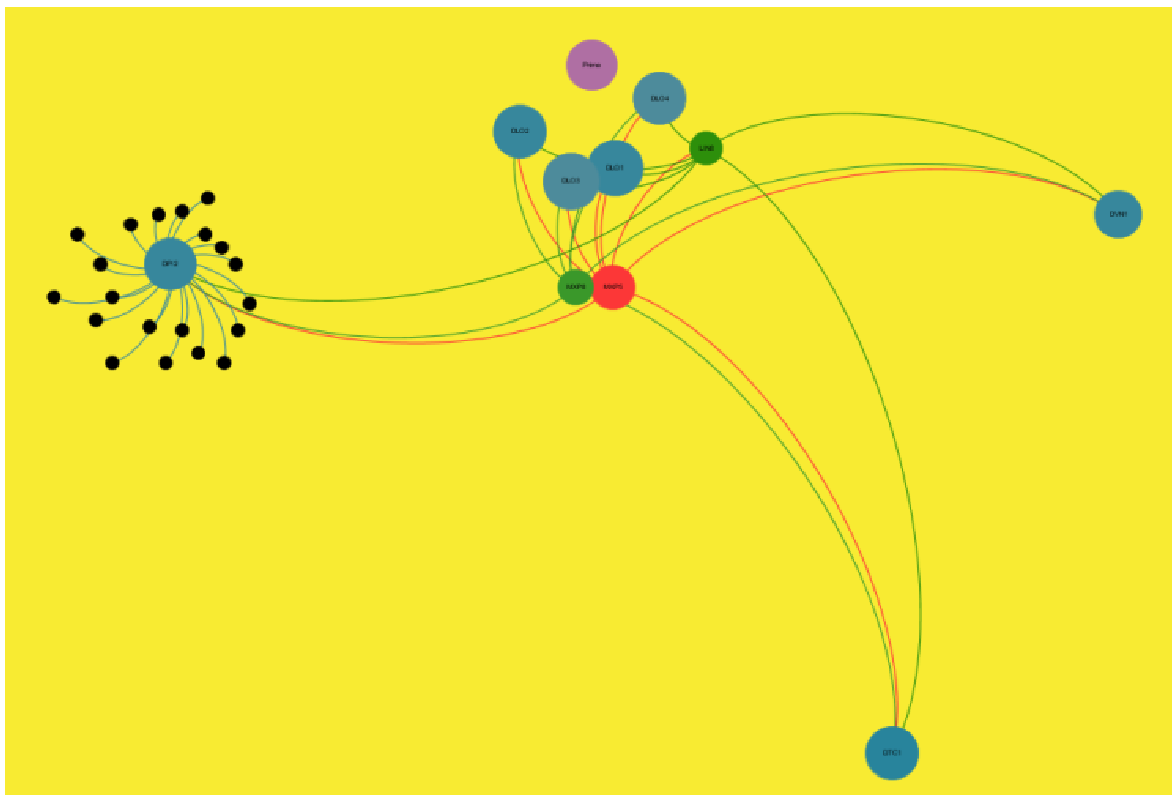
C’è un'altra imprecisione, però, a cui invece rimediamo subito. Il grafo infatti è monco, nel senso che esclude i nodi a monte, i fornitori e l’Inbound Cross Docks (IXD) di Dortmund, l’unico in Europa, aperto proprio nel 2018, che rifornisce i centri di distribuzione continentali con consegna della merce in 24 ore, ma mancano, soprattutto, i nodi a valle, cioè gli oltre 10 milioni di clienti italiani di Amazon. Nella figura che segue abbiamo inserito 20 clienti (C1, C2, …, C20) collocandoli intorno alla stazione di consegna di Brandizzo (DPI2), in rappresentanza di tutti i clienti italiani, lasciando immaginare che analoghe e, anzi, più fitti sciami di clienti attornino anche le altre *delivery station* della rete. Poiché inoltre a questo punto le stazioni di consegna risultano essere quelle con un numero maggiore di link, abbiamo opportunamente aumentato il diametro dei rispettivi nodi.

In questa seconda versione il *network* di Amazon ha un numero limitato di *hub* (le stazioni di consegna e i magazzini Prime, pochi in rapporto ai milioni di nodi-clienti lasciati alla vostra immaginazione) con un altissimo numero di link ed è facile osservare anche che se aggiungiamo un nuovo nodo è più probabile che si tratti di un cliente e che quindi esso si collegherà a uno di questi hub. Nel caso di grandi città, come Milano, poi, possiamo ipotizzare che il numero dei collegamenti cresca ulteriormente perché, anche se in linea di massima ogni stazione tenderà a servire i clienti più vicini, è presumibile che, in caso di necessità, ciascuna delle quattro stazioni possa servire tutti i clienti e avere un numero di link pari al numero di clienti a Milano moltiplicato per quattro. Non abbiamo inserito i nodi a monte, perché sono in numero limitato e quindi non intaccano questa caratteristica strutturale della rete.

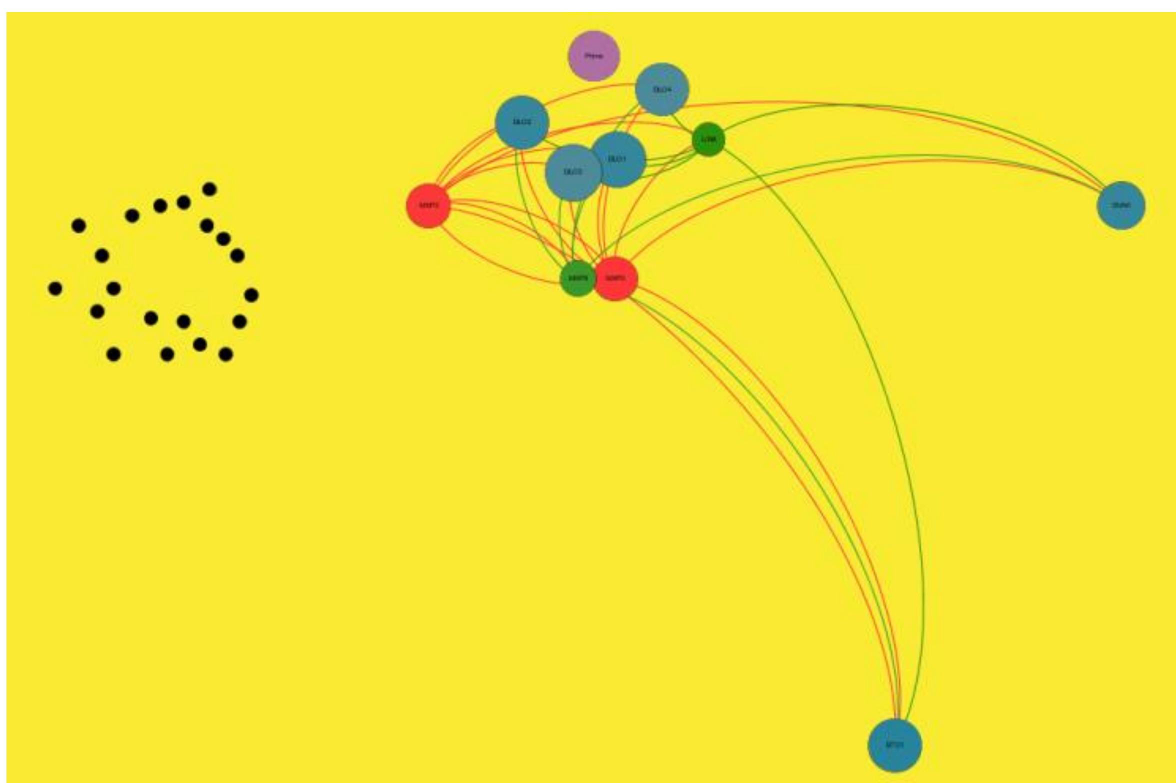


In sostanza mentre nel grafo dei magazzini Amazon in Italia gli *hub* sono i centri di distribuzione, che hanno un numero più alto (pur piccolo in valore assoluto) di *link*, se integriamo la rete coi clienti, essa sembra assumere caratteristiche analoghe a quella di una rete a invarianza di scala, cioè pochissimi nodi con un numero enorme di collegamenti e tantissimi poco connessi. Tuttavia possiamo osservare che ha una struttura molto diversa dalle più note reti a invarianza di scala, come la rete fisica di internet o quella che rappresenta i link tra i vari siti. Infatti non contiene cicli, cioè cammini che permettono di abbandonare un nodo e farvi ritorno senza mai ripercorrere una seconda volta lo stesso arco. Nella teoria dei grafi le reti di questo tipo si chiamano "alberi". Ma esistono anche alberi a invarianza di scala.

Che il *network* formato dai magazzini e dai clienti di Amazon goda di alcune proprietà caratteristiche delle reti a invarianza di scala suggerisce che anch'esso sia poco vulnerabile a perturbazioni che colpiscano in modo casuale i suoi nodi, ma possa essere messo a dura prova se vengono colpiti i suoi *hub*. Ciò confermerebbe una conclusione tratta empiricamente dagli attivisti sindacali americani e abbastanza controintuitiva. L'esperienza della fabbrica fordista ci spinge a pensare che i punti più vulnerabili della rete logistica amazoniana siano i magazzini più grandi: i centri di distribuzione. Questa previsione però non tiene conto di due aspetti. Uno è strettamente sindacale: bloccare un magazzino con migliaia di dipendenti è più difficile. L'altro invece è squisitamente matematico. Nelle due figure qui sotto abbiamo preso il grafo della rete di Amazon con la piccola "delegazione di clienti" e abbiamo cancellato rispettivamente il centro di distribuzione MXP3 e la stazione DPI2. Come si può vedere nel primo caso l'efficienza della rete viene preservata, perché i flussi possono essere reindirizzati sul centro di distribuzione MXP5 e raggiungere comunque tutte le stazioni di consegna e da esse i clienti.



Nel secondo caso, invece, un pezzo di rete, i clienti attorno a DPI2, resta isolata. Ovviamente in questo caso ciò avviene perché su quella zona insiste una sola *delivery station*, mentre nel caso di Milano la cancellazione di un solo nodo azzurro dalla rete potrebbe essere compensata facendo transitare la merce dagli altri tre. Perché i clienti milanesi restino isolati, dunque, è necessario cancellare tutti e quattro i nodi azzurri.



Ci fermiamo qui perché abbiamo ottenuto il nostro scopo, cioè dare un'idea di come la teoria dei grafi possa essere applicata alla logistica e, in particolare, il concetto di reti a invarianza di scala confermi alcune intuizioni maturate sul campo circa la vulnerabilità del *network* logistico di Amazon. Quest'ultima osservazione ci suggerisce altresì che il procedimento possa essere invertito, cioè che la formulazione di un modello più accurato e inevitabilmente più complesso della rete di Amazon, che cioè contenga una più puntuale ed esaustiva ricostruzione dei flussi di merce – i dati sulla pianificazione e sulla sincronizzazione di cui parla Bologna – permetta di formulare un'analisi più potente delle sue vulnerabilità e della sua resilienza, a cui l'osservazione empirica da sola non è in grado di attingere, pur potendola validare una volta formulata. Il nostro augurio è di aver indicato un campo di ricerca che qualcuno vorrà approfondire.